

# 加筋土桥台筋材轴力计算方法的对比与分析

程 岗<sup>1</sup>, 刘军海<sup>1</sup>, 陈艺文<sup>1</sup>, 赵崇熙<sup>2\*</sup>

(1. 合肥明巢高速公路有限公司, 安徽 合肥 230071; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 加筋土桥台具有成本低廉、施工简便、台下放坡占地需求小、对不均匀沉降适应性强等优势, 近年来在中外交通工程中广泛应用于跨线桥和涵洞桥等短跨度桥梁的建设中。加筋土桥台筋材的受力计算是结构设计中的重点。本文针对某高速公路试验段的非承重加筋土桥台设计方案, 分别采用基于极限平衡理论的《土工合成材料应用技术规范》方法和改进 K 刚度法, 以及基于极限状态理论的荷载和抗力系数方法计算了工作应力下格栅的轴力。结果显示通过改进 K 刚度法计算的格栅轴力明显小于另外两种方法的结果。文章还对结果进行了分析, 并讨论了三种计算方法在设计中的应用前景。

**关键词:** 加筋土桥台; 极限平衡理论; 改进 K 刚度法; 荷载和抗力系数法; 极限状态理论

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)04-0290-09

## Comparison and analysis of calculation methods for geogrid tension in geosynthetic-reinforced soil abutment

CHENG Gang<sup>1</sup>, LIU Jun-hai<sup>1</sup>, CHEN Yi-wen<sup>1</sup>, ZHAO Chong-xi<sup>2\*</sup>

(1. Hefei Mingchao Expressway Co., Ltd., Hefei, Anhui 230071, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Reinforced soil abutment has the advantages of low cost, simple construction, small land occupation requirement, and strong adaptability to uneven settlement. In recent years, reinforced soil abutment has been widely used in the construction of short span bridges such as overpasses and culverts of both domestic and foreign traffic engineering. The stress calculation of reinforced soil abutment reinforcement is the focus of structural design. Aiming at the design scheme of non-load bearing reinforced soil abutment in the test section of an expressway, three methods are used to calculate the axial force of the geogrid under working stress. Two of the methods are based on limit equilibrium theory, which is “the technical code for the application of geosynthetics”, together with the improved k-stiffness method, and another load and resistance factor design method which are based on the limit state theory. The results show that the geogrid axial calculated by the improved k-stiffness method is significantly less than that calculated by the other two methods. The results are also analyzed and the application prospect of the three methods in design is discussed.

**Key words:** reinforced soil abutment; limit equilibrium theory; improved k-stiffness method; load and resistance factor design method; limit state theory

## 0 引 言

加筋土桥台具有成本低廉、施工简便、台下放坡占地需求小等优点。其作为柔性结构, 能够较好地适应底部地基的变形, 避免顶部路面产生不均匀沉降, 影响行车。目前加筋土桥台技术已在欧美、日

本等地区获得广泛应用; 在我国云南等地也有一些试验性的工程, 现场检测显示工程运转状况普遍良好。

对加筋土桥台的研究包括工程监测、模型试验和数值模拟等手段, 自加筋土桥台投入使用以来, 研究者们通过上述手段对加筋土桥台进行了多方

收稿日期: 2021-06-11

作者简介: 程岗 (1973—), 男, 安徽南陵人, 高级工程师, 主要从事公路工程建设管理工作。E-mail: 519190197@qq.com。

\*通讯作者: 赵崇熙 (1993—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事加筋土结构承载力方面研究。E-mail: 791485082@qq.com。

面的研究。对多座加筋土桥台服役期的监测显示该结构可以杜绝桥头跳车现象的发生,同时面板处土压力、侧向位移及顶部沉降也远低于设计预期值和保证服役性能所要求的允许值<sup>[1-3]</sup>。加筋土桥台的模型试验主要关注桥台的极限承载力及筋材受力方面的问题。研究结果显示桥梁荷载作用位置及筋材间距对加筋土桥台极限承载力有关键影响<sup>[4-5]</sup>,桥台内部筋材拉力受桥台趾部阻力等因素的影响将小于规范计算值<sup>[6]</sup>。在高加速度下的桥台离心模型试验中还观察到了显著的筋材内力重分布<sup>[7]</sup>。对加筋土桥台的数值模拟表明桥台内部的土工格栅对浇筑台帽和吊装梁板等局部较为集中的荷载有较强的扩散作用<sup>[8]</sup>,并且可以有效改善梁底的不均匀沉降<sup>[9]</sup>。对加筋土桥台进行的参数研究则指出桥台变形主要受筋材间距和筋材刚度的影响,其中筋材间距的影响更为显著<sup>[10-11]</sup>。

筋材的受力对加筋土桥台的内部稳定性有着至关重要的影响,但此方面的理论分析较少。相关技术标准或设计方法中提出的筋材受力分析方法均是基于土压力理论提出的经验计算方法<sup>[12-14]</sup>。为了对比各类计算方法中筋材受力的计算,本文针对某高速公路试验段的非承重式加筋土桥台设计方案,采用不同方法计算了工作状态下桥台筋材的受力情况及安全系数,并针对各计算方法获得结果的差异进行了分析与讨论。

## 1 工程设计概况

计算中的非承重式加筋土桥台包括桥台挡墙高 6 m 和桥台挡墙及台上路堤总高 12 m 两种桥台断面。根据桥梁承重结构与桥台的位置关系,每种断面下又可分为两大类工况,分别为桥梁承重柱位于桥台内部的包裹式桥台和桥梁承重肋板在桥台外侧的分离式桥台。如图 1 为包裹式挡墙设计示意图,如图 2 为分离式挡墙设计示意图。

挡墙设计高 6 m 的包裹式桥台断面,墙面坡度为 20:1,按照最不利状态其中地下埋置部分 1 m,地上部分 5 m。挡墙顶部自面板后缘起 3 m 处(1.5 m 柱前长度,1.5 m 桥柱直径)设置 1.2 m 高的路堤。土工格栅布置竖向间距 0.4 m,长度 5 m,底层筋材距地基表面 0.2 m。

挡墙设计高 6 m 的分离式桥台断面,墙面坡度为 20:1,按照最不利状态其中地下埋置部分 1 m,地上部分 5 m。挡墙顶即设置 2.1 m 高的路堤。土工格栅布置竖向间距 0.4 m,长度 5 m,底层筋材距

地基表面 0.2 m。

挡墙高 6 m 的桥台使用的土工格栅为 A 型单向土工格栅,抗拉强度为 80 kN/m,老化折减系数 1.1,施工损伤系数 1.25,蠕变折减系数 3。

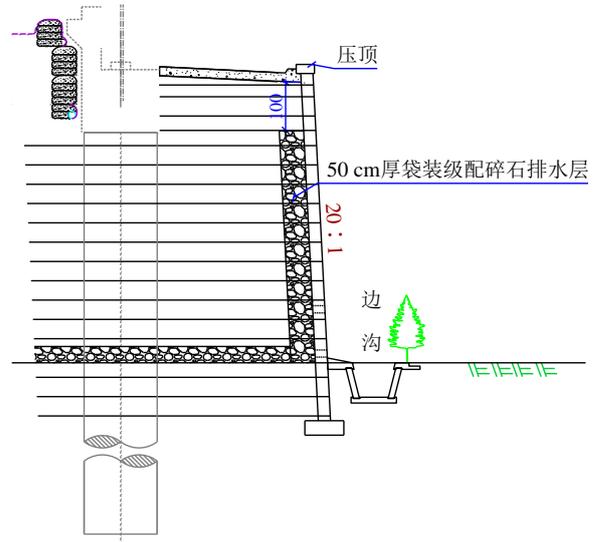


图 1 包裹式桥台设计示意图

Fig. 1 Schematic design of wrapped abutment

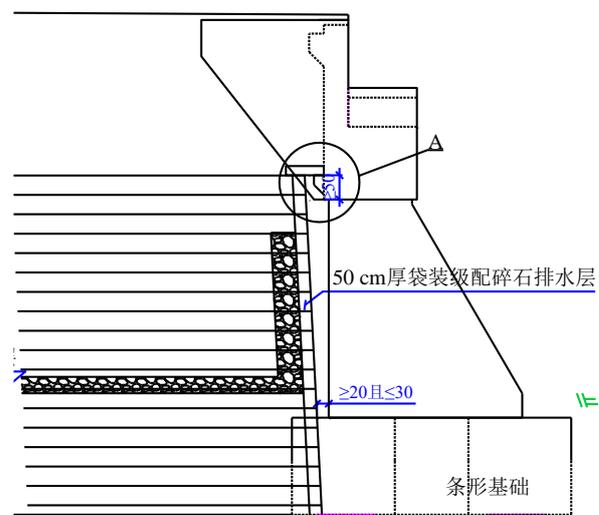


图 2 分离式桥台设计示意图

Fig. 2 Schematic design of separated abutment

桥台挡墙及台上路堤总高 12 m 的包裹式桥台断面,墙面坡度为 20:1,挡墙全高 10.9 m,按照最不利状态其中地下埋置部分 1 m,地上部分 9.9 m。挡墙顶部自面板后缘起 3 m 处(1.5 m 柱前长度,1.5 m 桥柱直径)设置 1.2 m 高的路堤。土工格栅布置竖向间距 0.4 m,长度 7.9 m,底层筋材距地基表面 0.2 m。

桥台挡墙及台上路堤总高 12 m 的分离式桥台断面,墙面坡度为 20:1,挡墙全高 9.9 m,按照最不利状态其中地下埋置部分 1 m,地上部分 8.9 m。

挡墙顶即设置 2.1 m 高的路堤。土工格栅布置竖向间距 0.4 m，长度 7.9 m，底层筋材距地基表面 0.2 m。

桥台挡墙及台上路堤总高 12 m 的桥台使用的土工格栅为 B 型单向土工格栅，抗拉强度为 120 kN/m，老化折减系数 1.1，施工损伤系数 1.25，蠕变折减系数 3。

墙面砌块截面尺寸为 200 mm×200 mm，设计重度 23 kN/m<sup>3</sup>。加筋区填土设计重度为 19 kN/m<sup>3</sup>，内摩擦角 35°，黏聚力 0 kPa。桥台顶部路堤上设计道路荷载 20 kPa。

## 2 容许应力设计原则计算格栅轴力

采用了两种不同的容许应力设计原则计算方法对土工格栅轴力进行了分析计算，分别为我国现行标准《土工合成材料应用技术规范》<sup>[12]</sup>中给出的计算方法和 Allen 和 Bathurst 提出的改进 K 刚度法<sup>[13]</sup>。

### 2.1 《土工合成材料应用技术规范》计算格栅轴力

《土工合成材料应用技术规范》<sup>[12]</sup>中给出的计算填土中每一层筋材的最大拉力  $T_{\max}$  方法为：

$$T_{\max} = K_a S_v (\gamma z + q) \quad (1)$$

式中： $K_a$  为库仑主动土压力系数； $S_v$  为筋材垂直间距，m； $\gamma$  为填土重度，kN/m<sup>3</sup>； $z$  为筋材至挡墙顶面垂直深度，m； $q$  为墙顶面上的均布荷载，kPa。

筋材的容许最大拉力  $T_{\text{ava}}$  计算方法为：

$$T_{\text{ava}} = \frac{T_{\text{ult}}}{RF_d \times RF_{\text{id}} \times RF_c} \quad (2)$$

式中： $T_{\text{ult}}$  为筋材抗拉强度，kN/m； $RF_d$  为老化折减系数； $RF_{\text{id}}$  为施工损伤系数； $RF_c$  为蠕变折减系数。

由此计算得到 A 型单向土工格栅的容许最大拉力  $T_{\text{ava}}$  为 19.39 kN/m；B 型单向土工格栅的容许最大拉力  $T_{\text{ava}}$  为 29.09 kN/m。

MSEW3.0 软件中内置的筋材轴力计算功能即基于公式 (1)、(2) 计算。采用 MSEW3.0 软件对各工况下非承重式桥台的土工格栅轴力进行计算，结果如表 1 和表 2 所示。

### 2.2 改进 K 刚度法计算格栅轴力

改进 K 刚度法是一种经验计算方法，由 Allen 和 Bathurst 基于原有的 K 刚度法改进而来，主要思想认为挡墙在工作应力下，具有一定埋深的墙趾部分受墙外埋深高度土体提供的侧向阻力，能承担大部分的侧向土压力，因此内部筋材拉力沿高度呈梯形分布<sup>[13]</sup>。

表 1 挡墙高 6 m 桥台依《土工合成材料应用技术规范》计算格栅  $T_{\max}$  结果

Table 1  $T_{\max}$  value results of the geogrid calculated (Technical code method, height of 6 m)

格栅距挡墙顶面距离/m	包裹式桥台		分离式桥台	
	$T_{\max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{\text{ava}}/T_{\max}$	$T_{\max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{\text{ava}}/T_{\max}$
5.8	15.70	1.235	18.44	1.052
5.4	14.88	1.304	17.61	1.101
5.0	14.05	1.380	16.79	1.155
4.6	13.23	1.466	15.97	1.215
4.2	12.41	1.563	15.14	1.281
3.8	11.58	1.674	14.32	1.354
3.4	10.76	1.803	13.50	1.437
3.0	9.94	1.952	12.67	1.531
2.6	9.11	2.129	11.85	1.637
2.2	8.29	2.340	11.02	1.759
1.8	7.46	2.598	10.20	1.901
1.4	6.64	2.921	9.38	2.068
1.0	5.82	3.334	8.55	2.268
0.6	4.99	3.885	7.73	2.509
0.2	4.17	4.652	6.90	2.809

表 2 挡墙及路堤总高 12 m 桥台依《土工合成材料应用技术规范》计算格栅  $T_{max}$  结果  
Table 2  $T_{max}$  value results of the geogrid calculated (Technical code method, height of 12 m)

包裹式桥台			分离式桥台		
格栅距挡墙顶面距离/m	$T_{max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$	格栅距挡墙顶面距离/m	$T_{max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$
10.8	26.19	1.111	9.8	26.47	1.099
10.6	25.37	1.147	9.4	25.65	1.134
10.2	24.54	1.185	9.0	24.82	1.172
9.8	23.72	1.226	8.6	24.00	1.212
9.4	22.90	1.271	8.2	23.18	1.255
9.0	22.07	1.318	7.8	22.35	1.302
8.6	21.25	1.369	7.4	21.53	1.351
8.2	20.42	1.424	7.0	20.70	1.405
7.8	19.60	1.484	6.6	19.88	1.463
7.4	18.78	1.549	6.2	19.06	1.527
7.0	17.95	1.620	5.8	18.23	1.596
6.6	17.13	1.698	5.4	17.41	1.671
6.2	16.30	1.784	5.0	16.58	1.754
5.8	15.48	1.879	4.6	15.76	1.846
5.4	14.66	1.985	4.2	14.94	1.948
5.0	13.83	2.103	3.8	14.11	2.061
4.6	13.01	2.236	3.4	13.29	2.189
4.2	12.19	2.387	3.0	12.47	2.334
3.8	11.36	2.560	2.6	11.64	2.499
3.4	10.54	2.761	2.2	10.82	2.689
3.0	9.71	2.995	1.8	9.99	2.911
2.6	8.89	3.272	1.4	9.17	3.172
2.2	8.07	3.606	1.0	8.35	3.485
1.8	7.24	4.017	0.6	7.52	3.867
1.4	6.42	4.532	0.2	5.10	5.703
1.0	5.60	5.199	—	—	—
0.6	3.66	7.958	—	—	—
0.2	2.18	13.346	—	—	—

根据 Allen 和 Bathurst 中的研究, 加筋土挡墙中某一层格栅的最大拉力  $T_{max}$  按下式计算:

$$T_{max} = S_v \left[ \gamma_r H D_{tmax} + \left( \frac{H_{ref}}{H} \right) \gamma_f S \right] K_{avh} \Phi_{fb} \Phi_{fs} \Phi_g \Phi_{local} \Phi_c \quad (3)$$

式中:  $S_v$  为计算层筋材的垂直层间距, m;  $\gamma_r$  为加筋区填料重度, kN/m<sup>3</sup>;  $H$  为挡墙高度, m;  $D_{tmax}$  为最大拉力分布系数;  $H_{ref}$  为参考高度, 6 m;  $\gamma_f$  为挡墙

顶部均布垂直荷载等效土层的重度, kN/m<sup>3</sup>;  $S$  为挡墙顶部均布垂直荷载等效土层的厚度, m;  $K_{avh}$  为对应于垂直挡墙的主动土压力系数;  $\Phi_{fb}$  为面板倾斜参数;  $\Phi_{fs}$  为面板刚度参数;  $\Phi_g$  为全局刚度参数;  $\Phi_{local}$  为局部刚度系数;  $\Phi_c$  为土体黏聚力参数。

其中最大拉力分布系数  $D_{tmax}$  的取值由筋材距挡墙顶部的垂直距离  $z$  决定。

对于  $z < z_b$

$$D_{tmax} = D_{tmax0} + \left(\frac{z}{z_b}\right) \times (1 - D_{tmax0}) \quad (4)$$

对于  $z \geq z_b$

$$D_{tmax} = 1 \quad (5)$$

其中： $D_{tmax0}$  为在挡墙顶部的  $D_{tmax}$  值，根据 Allen 和 Bathurst 的研究取 0.12<sup>[13]</sup>； $z_b$  为距挡墙顶部破坏点深度，m。

为了便于改进 K 刚度法计算，对所涉及的工况进行如下简化假设：

(1) 格栅上最大轴力处即为格栅与面板的连接处。

(2) 将桥台顶部的路堤等结构物按照其相应的最大厚度等效为布满桥台顶端的均布荷载，道路荷载也相应的布满桥台顶端，按照这种荷载考虑方式，计算结果将是趋于保守的，即格栅轴力计算结果偏大。

(3) 倾斜挡墙面板简化为垂直挡墙面板，因此  $K_{avh}$  可取朗金主动土压力系数，此假设所获得计算结果也将是趋于保守的，对于本文中分析的四种工况均有  $K_{avh}=0.27$ 。

本文分析中采用改进 K 刚度法时的各计算参数取值见表 3。

根据改进 K 刚度法对各工况下非承重式桥台的土工格栅轴力进行计算，结果如表 4 和表 5 所示。

表 3 改进 K 刚度法各计算参数取值

Table 3 Values of calculation parameters of improved k-stiffness method

工况	$z_b$	$\Phi_{fb}$	$\Phi_{fs}$	$\Phi_g$	$\Phi_{local}$	$\Phi_e$
挡墙高 6 m 包裹式桥台	3.43	1	1	0.37	1	1
挡墙高 6 m 分离式桥台	3.43	1	1	0.37	1	1
挡墙及路堤总高 12 m 包裹式桥台	7.03	1	1	0.42	1	1
挡墙及路堤总高 12 m 分离式桥台	6.26	1	1	0.42	1	1

表 4 挡墙高 6 m 桥台改进 K 刚度法计算格栅  $T_{max}$  结果

Table 4  $T_{max}$  value results of the geogrid calculated (Improved k-stiffness method, height of 6 m)

格栅距挡墙顶面距离/m	包裹式桥台		分离式桥台	
	$T_{max}/(kN/m)$	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$	$T_{max}/(kN/m)$	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$
5.8	6.34	3.058	7.04	2.757
5.4	6.34	3.058	7.04	2.757
5.0	6.34	3.058	7.04	2.757
4.6	6.34	3.058	7.04	2.757
4.2	6.34	3.058	7.04	2.757
3.8	6.34	3.058	7.04	2.757
3.4	6.30	3.078	6.99	2.773
3.0	5.83	3.327	6.52	2.974
2.6	5.36	3.621	6.05	3.207
2.2	4.89	3.971	5.58	3.479
1.8	4.41	4.397	5.10	3.801
1.4	3.94	4.924	4.63	4.189
1.0	3.47	5.596	4.16	4.665
0.6	2.99	6.479	3.69	5.263
0.2	2.52	7.694	3.21	6.038

表 5 挡墙及路堤总高 12 m 桥台改进 K 刚度法计算格栅  $T_{max}$  结果  
Table 5  $T_{max}$  value results of the geogrid calculated (Improved k-stiffness method, height of 12 m)

包裹式桥台			分离式桥台		
格栅距挡墙顶面距/m	$T_{max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$	格栅距挡墙顶面距离/m	$T_{max}$ /(kN/m)	安全系数 $T_{ava}/T_{max}$
10.8	10.57	2.753	9.8	10.24	2.842
10.6	10.57	2.753	9.4	10.24	2.842
10.2	10.57	2.753	9.0	10.24	2.842
9.8	10.57	2.753	8.6	10.24	2.842
9.4	10.57	2.753	8.2	10.24	2.842
9.0	10.57	2.753	7.8	10.24	2.842
8.6	10.57	2.753	7.4	10.24	2.842
8.2	10.57	2.753	7.0	10.24	2.842
7.8	10.57	2.753	6.6	10.24	2.842
7.4	10.57	2.753	6.2	10.04	2.898
7.0	10.18	2.859	5.8	9.56	3.045
6.6	9.70	2.999	5.4	9.08	3.206
6.2	9.23	3.154	5.0	8.59	3.386
5.8	8.75	3.325	4.6	8.11	3.588
5.4	8.28	3.516	4.2	7.63	3.814
5.0	7.80	3.730	3.8	7.15	4.072
4.6	7.33	3.972	3.4	6.66	4.366
4.2	6.85	4.247	3.0	6.18	4.707
3.8	6.38	4.564	2.6	5.70	5.105
3.4	5.90	4.931	2.2	5.22	5.577
3.0	5.43	5.363	1.8	4.74	6.145
2.6	4.95	5.878	1.4	4.25	6.842
2.2	4.48	6.502	1.0	3.77	7.717
1.8	4.00	7.274	0.6	3.29	8.848
1.4	3.53	8.255	0.2	2.81	10.369
1.0	3.05	9.541	—	—	—
0.6	2.57	11.302	—	—	—
0.2	2.34	12.451	—	—	—

### 3 荷载和抗力系数 (LRFD) 方法计算格栅轴力

荷载和抗力系数方法计算填土中每一层筋材的最大拉力  $T_{max}$  方法形式上与式 (1) 相同, 但其中需通过在计算时采用不同的荷载分项系数以模拟不同失稳形式和工程不确定性。根据美国联邦公路局 (FHWA) 2011 年出版的 FHWA-NHI-10-024 规范<sup>[14]</sup>, 计算格栅轴力时需考虑的荷载分项系数为竖

向土压力荷载分项系数 1.35; 超载活荷载分项系数 1.75。采用超载静荷载分项系数 1.5。此外荷载和抗力系数法对格栅强度进行计算时还需考虑格栅抗力折减系数, 按照 FHWA-NHI-10-024 规范, 该值一般取 0.9。因此折减后 A 型单向土工格栅容许最大拉力  $T_{avaR}=17.45$  kN/m; B 型单向土工格栅容许最大拉力  $T_{avaR}=26.18$  kN/m。

根据荷载和抗力系数方法对各工况下非承重式桥台的土工格栅轴力进行计算, 结果如表 6 和表 7 所示。其中用承载力保证率代替了安全系数。

表6 挡墙高6 m桥台依荷载和抗力系数方法计算格栅  $T_{\max}$  结果  
Table 6  $T_{\max}$  value results of the geogrid calculated (RFD method, height of 6 m)

格栅距挡墙顶面距离/m	包裹式桥台		分离式桥台	
	$T_{\max}/(\text{kN/m})$	承载力保证率 $T_{\text{avaR}}/T_{\max}$	$T_{\max}/(\text{kN/m})$	承载力保证率 $T_{\text{avaR}}/T_{\max}$
5.8	22.06	0.791	23.42	0.662
5.4	20.95	0.833	22.44	0.692
5.0	19.84	0.880	21.45	0.723
4.6	18.73	0.932	20.46	0.758
4.2	17.62	0.991	19.47	0.797
3.8	16.50	1.058	18.48	0.839
3.4	15.39	1.134	17.49	0.887
3.0	14.28	1.222	16.50	0.940
2.6	13.17	1.326	15.52	1.000
2.2	12.06	1.448	14.53	1.068
1.8	10.94	1.595	13.54	1.146
1.4	9.83	1.775	12.55	1.236
1.0	8.72	2.002	11.56	1.342
0.6	7.61	2.295	10.57	1.467
0.2	6.49	2.688	9.58	1.619

## 4 分析及讨论

对比《土工合成材料应用技术规范》计算方法、改进 K 刚度计算方法、荷载和抗力系数计算方法对设计工况中的格栅轴力计算结果显示,三种方法中格栅轴力计算结果存在一定的差异。其中荷载和抗力系数法计算结果显示靠近底面的数层(挡墙高 6 m 桥台底部 5 层,挡墙及路堤总高 12 m 桥台底部 11 层)格栅强度不能通过承载力保证率大于 1 的要求,同时《土工合成材料应用技术规范》算法也显示靠近底面的数层(底部 7 层)格栅强度的安全系数也仅略为大于 1,即此两种方式的结果认为设计的格栅强度储备不足。然而与上述两种方法得到的格栅轴力沿墙高呈三角形分布不同,改进 K 刚度法的计算结果呈现出格栅轴力沿墙高梯形分布的规律,即从顶部向下格栅轴力先增大,至一定高度后不再变化,此高度以下的格栅轴力保持一致,并且改进 K 刚度法计算的格栅轴力远小于另两种方法的轴力计算结果,格栅强度储备也远高于另两种方法。

造成计算结果差异的原因是由于荷载和抗力系数法和《土工合成材料应用技术规范》算法均认为加筋土结构中水平土压力由格栅承担,挡墙面板、趾部约束、筋材刚度等因素对格栅受力的影响都没有考虑在内。然而改进 K 刚度法通过引入面板

刚度参数、全局刚度参数、局部刚度系数和最大拉力分布系数等参数将上述对格栅受力可能造成影响的考虑在内。

荷载和抗力系数法和《土工合成材料应用技术规范》算法的结果差异则是由于结构安全性设计思路的差异。荷载和抗力系数法基于极限状态法,以不同的分项系数来表示荷载和材料强度在工程运营期间的不确定性,各分项系数的取值均基于概率理论。这种方法计算的格栅轴力是多种不确定性因素作用下可能遭受的最大轴力,因此安全性也采用承载力保证率加以评估。而《土工合成材料应用技术规范》将所有不确定因素整合入一个安全系数中,格栅轴力计算中的各项荷载值未引入修正系数,因而计算结果与荷载和抗力系数法存在差异。由于荷载和抗力系数法考虑了更多实际情况下存在的不确定性,因此对于结构安全性的考虑较《土工合成材料应用技术规范》中更为全面。目前世界各国的设计原则也逐渐从容许应力法向以概率论为基础的极限状态法转变,我国的《土工合成材料应用技术规范》也有进一步改进的必要。

三种设计计算的结果表明,在不考虑墙趾部分分担结构水平土压力条件下,荷载和抗力系数法和《土工合成材料应用技术规范》计算的筋材轴力较改进 K 刚度法更为保守。但改进 K 刚度法的准确

性仅限于桥台或挡墙处于工作应力状态下,且需要计算对象的工况与改进 K 刚度法的校准案例数据库中挡墙工况较为接近。因此设计计算中如采用改

进 K 刚度法计算,需要对挡墙的荷载、几何尺寸、筋材布置、边界约束条件等特征进行评估,并设定一个较高的安全系数以保证结构的安全性。

表7 挡墙及路堤总高 12 m 桥台依荷载和抗力系数方法计算格栅  $T_{\max}$  结果  
Table 7  $T_{\max}$  value results of the geogrid calculated (RFD method, height of 12 m)

包裹式桥台			分离式桥台		
格栅距挡墙顶面 距离/m	$T_{\max}/(\text{kN/m})$	承载力保证率 $T_{\text{avaR}}/T_{\max}$	格栅距挡墙顶面 距离/m	$T_{\max}/(\text{kN/m})$	承载力保证率 $T_{\text{avaR}}/T_{\max}$
10.8	36.22	0.723	9.8	37.25	0.703
10.6	35.11	0.746	9.4	36.14	0.724
10.2	34.00	0.770	9.0	35.03	0.747
9.8	32.89	0.796	8.6	33.91	0.772
9.4	31.78	0.824	8.2	32.80	0.798
9.0	30.66	0.854	7.8	31.69	0.826
8.6	29.55	0.886	7.4	30.58	0.856
8.2	28.44	0.921	7.0	29.47	0.889
7.8	27.33	0.958	6.6	28.35	0.923
7.4	26.21	0.999	6.2	27.24	0.961
7.0	25.10	1.043	5.8	26.13	1.002
6.6	23.99	1.091	5.4	25.02	1.047
6.2	22.88	1.144	5.0	23.91	1.095
5.8	21.77	1.203	4.6	22.79	1.149
5.4	20.65	1.268	4.2	21.68	1.208
5.0	19.54	1.340	3.8	20.57	1.273
4.6	18.43	1.421	3.4	19.46	1.346
4.2	17.32	1.512	3.0	18.34	1.427
3.8	16.21	1.616	2.6	17.23	1.519
3.4	15.09	1.735	2.2	16.12	1.624
3.0	13.98	1.873	1.8	15.01	1.745
2.6	12.87	2.034	1.4	13.90	1.884
2.2	11.76	2.227	1.0	12.78	2.048
1.8	10.64	2.460	0.6	11.67	2.243
1.4	9.53	2.747	0.2	8.02	3.263
1.0	8.42	3.109	—	—	—
0.6	5.59	4.687	—	—	—
0.2	3.38	7.755	—	—	—

## 5 结 论

本文基于非承重式加筋土桥台的设计方案,利用不同方法对四种设计工况下的格栅轴力进行了计算,并对比了计算结果。采用计算方法包括荷载和抗力系数法、《土工合成材料应用技术规范》计算

法和改进 K 刚度法。得出如下四点结论。

(1) 荷载和抗力系数法和《土工合成材料应用技术规范》方法计算得到的格栅轴力沿墙高呈现三角形分布,且底层格栅轴力接近或超过设计中的格栅容许最大拉力,在此二种方法的计算下设计中的格栅缺乏足够的强度储备。

(2) 改进 K 刚度法的计算结果显示,格栅轴

力沿墙高呈现梯形分布,且各层格栅轴力均远低于格栅容许最大拉力,具有足够的强度储备。

(3)改进K刚度法与另外两种方法的计算结果差异是由于对结构水平荷载的分担方式考虑不同造成的。对于改进K刚度法,在设计中采用时应慎重的考虑这一经验公式是否适用于设计工况。

(4)荷载和抗力系数法和《土工合成材料应用技术规范》方法的差异在于对不确定性的考虑原则不同。设计中以极限状态法为基础的荷载和抗力系数法更能保证结构的安全性。

### 参考文献

- [1] ABU-HEJLEH N, ZORNBERG J G, WANG T, et al. Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting the Founders/Meadows Bridge and approaching roadway structures[J]. Report 2: Assessment of the Performance and Design of the Front GRS Walls and Recommendations for Future GRS Abutments, 2001.
- [2] ADAMS M, NICKS J, STABILE T, et al. Geosynthetic reinforced soil integrated bridge system, synthesis report[R]. United States: Federal Highway Administration, 2011.
- [3] SAGHEBFAR M, ABU-FARSAKH M, ARDAH A, et al. Performance monitoring of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system (GRS-IBS) in louisiana[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(2): 34-47.
- [4] 肖成志, 陈倩倩, 韩杰, 等. 顶部条形基础作用下加筋挡墙性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1586-1592.  
XIAO Cheng-zhi, CHEN Qian-qian, HAN Jie, et al. Experimental study of performance of geogrid-reinforced retaining wall subjected to load from strip foundation at the top surface of wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1586-1592.
- [5] PHAM T Q. Investigating composite behavior of Geosynthetic-Reinforced Soil (GRS) mass[J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2009.
- [6] ZHANG W, CHEN J F, YU Y. Influence of toe restraint conditions on performance of geosynthetic-reinforced soil retaining walls using centrifuge model tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(5): 653-661.
- [7] COSTA C M L, ZORNBERG J G, BUENO B D S, et al. Centrifuge evaluation of the time-dependent behavior of geotextile-reinforced soil walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(2): 188-200.
- [8] 周志刚, 郑健龙, 宋蔚涛. 土工格栅加筋柔性桥台的机理分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1): 18-21.  
ZHOU Zhi-gang, ZHENG Jian-long, SONG Wei-tao. Analysis of mechanism of flexible abutment reinforced by geogrids[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1): 18-21.
- [9] DETERT O, ALEXIEW D. Physical and numerical analyses of a geogrid-reinforced soil system for bridge abutments[J]. Proceedings of "From Research to Design in European Practice", Bratislava, Slovak Republic, 2010.
- [10] LIU H. Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 32: 18-27.
- [11] ABU-FARSAKH M Y, ARDAH A, VOYIADJIS G Z. Numerical parametric study to evaluate the performance of a geosynthetic reinforced soil-integrated bridge system (GRS-IBS) under service loading[J]. Transportation Geotechnics, 2019.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 土工合成材料应用技术规范: GB/T 50290—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [13] TONY M A, RICHARD J B. Improved simplified method for prediction of loads in reinforced soil walls[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(11): 04015049.
- [14] FHWA-NHI-10-024. Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes - Volume I[S]. U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009.